

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ได้รวบรวมเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย ได้แก่

1. ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับข้าว
 - 1.1 ความหมายของข้าว
 - 1.2 โครงสร้างของเมล็ดข้าว
 - 1.3 รำข้าว (rice bran)
2. ข้าวเหนียวดำ
3. สารที่มีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระในข้าวเหนียวดำ
 - 3.1 วิตามินอี
 - 3.2 แกมมาออริซานอล
 - 3.3 สารประกอบฟีนอล
 - 3.4 กรดไฟติก/ไฟเตท
 - 3.5 แอนโทไซยานิน
4. สารที่นิยมใช้เป็นสารให้ความคงตัวในอาหาร
 - 4.1 ทรีฮาโลส (trehalose)
 - 4.2 ไซโคลเด็กซ์ทริน (cyclodextrin)
 - 4.3 มอลโตเด็กซ์ทริน (maltodextrin)
5. สีผสมอาหาร
 - 5.1 วัตถุประสงค์โดยทั่วไปของการใช้สีผสมอาหาร
 - 5.2 ประเภทของสีผสมอาหาร
6. ระบบการวัดค่าสี
 - 6.1 ค่าสี (hue)
 - 6.2 ค่าความสว่าง (lightness)
 - 6.3 ค่าความเข้มของสี (chroma)
7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
 - 7.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาสารออกฤทธิ์ชีวภาพและการออกฤทธิ์ต่อสุขภาพ
 - 7.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาศักยภาพในการเป็นสีผสมอาหาร

ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับข้าว

ความหมายของข้าว

ข้าว (rice) เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวในตระกูล *Oryza* จัดอยู่ในวงศ์ *Gramineae* และมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Oryza sativa* L.

โครงสร้างของเมล็ดข้าว

ข้าว เป็นคำทั่วไปที่ใช้เรียกเมล็ดข้าว (rice fruit, rice grain หรือ rice seed) ซึ่งทางพฤกษศาสตร์ หมายถึง ผล (fruit) ที่มีลักษณะเป็นผลเดี่ยว (single fruit) เกิดจากรังไข่อันเดียวชนิดลอยตัว (superior ovary) ของดอกเดี่ยวในแต่ละดอกย่อย ที่เกิดรวมกันอยู่เป็นช่อดอก ผลเดี่ยวนี้ติดแน่นอยู่กับผนังของรังไข่หรือเยื่อหุ้มผล (pericarp) ซึ่งเมื่อผลสุกหรือแก่จะเป็นผลแห้ง (dry fruit) ที่ไม่แตก (indehiscent fruit) เรียกว่าเมล็ด (caryopsis grain) มีเยื่อหุ้มผล และเปลือกหุ้มเมล็ด (seed coat หรือ testa) เชื่อมรวมกันอย่างแน่นหนาโดยตลอด ผลหรือเมล็ดข้าวจะมีลักษณะแตกต่างกันตามสายพันธุ์ ในด้านขนาด รูปร่าง สี การมีหางข้าว (awn) หรือไม่มีหางข้าว และการมีขน (pubescence) หรือไม่มีขนบนเปลือกแข็ง (hull หรือ husk) โดยทั่วไปข้าวประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ (อรอนงค์ นัยวิบูล. 2547 : 42-50)

1. ส่วนประกอบภายนอก เป็นส่วนที่ห่อหุ้มนอกสุดของเมล็ดที่โดยทั่วไป เรียกว่า แกลบ (hull) หรือเปลือกคอกอันใหญ่ (lemma) ซึ่งจะหลุดออกในระหว่างกระบวนการกะเทาะเปลือก โดยแกลบประกอบขึ้นด้วยเซลลูโลส (cellulose) มีลักษณะเป็นเส้นใย (fibrous) ส่วนผิวปกคลุมด้วยขนแหลมแข็งเปราะเรียกว่า ไตรโคม (trichomes) นอกจากนี้ยังมีข้าวเมล็ด (rachilla) และกลีบรองเมล็ด (sterile lemma)

2. ส่วนประกอบภายใน เมื่อแกะเปลือกหรือแกลบออกจะเรียกส่วนภายในว่า “ข้าวกล้อง” ที่ประกอบด้วย

2.1 เยื่อหุ้มผล (pericarp) เป็นเนื้อเยื่อชั้นนอก มีความหนาประมาณ 10 ไมครอน ห่อหุ้มผลอยู่ในประกอบด้วยเนื้อเยื่อ 3 ชั้น คือ เนื้อเยื่อชั้นนอกหรือเอพิคาร์พ (epicarp) หรือ เอกโซคาร์พ (exocarp) เป็นผิวหรือผนังหรือเปลือกที่อยู่นอกสุด มีลักษณะเรียบเหนียว และเป็นมัน ประกอบด้วยเซลล์ชั้นเดียว เนื้อเยื่อชั้นกลางหรือมิโซคาร์พ (mesocarp) หรือ ไฮโปเดิร์ม (hypoderm) เป็นผนังผลชั้นกลาง และเนื้อเยื่อชั้นในหรือเอ็นโดคาร์พ (endocarp) ส่วนของผนังเซลล์ประกอบด้วยโปรตีน (protein) เยื่อหุ้มผลมีลักษณะเป็นเส้นใย (fibrous) 6 ชั้น มีสารสีหรือรงควัตถุปนอยู่ ทำให้ข้าวกล้องมีสีต่างๆ เช่น น้ำตาลอ่อน น้ำตาลแก่ น้ำตาลแดง น้ำตาลม่วง น้ำตาลจนเกือบดำ เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีความอ่อนนุ่ม เป็นส่วนที่ป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์หรือไอน้ำ ซึ่งขณะที่เยื่อหุ้มผลยังไม่ถูกทำลายช่วยป้องกันการทำลาย

ของเชื้อรา การทำปฏิกิริยาองค์ประกอบของเอ็นโดสเปิร์มกับออกซิเจนหรือขบวนการเสื่อมสภาพ จากปฏิกิริยาของเอนไซม์ นอกจากนี้ยังมีโปรตีน เสมิเซลลูโลส และเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบสำคัญ

2.2 เยื่อหุ้มเมล็ด (seed coat) อยู่ถัดจากเยื่อหุ้มผล ประกอบด้วยเนื้อเยื่อ 2 ชั้น เรียงเป็นแถว และมีผนังบางกัน (หนาประมาณ 0.5 ไมครอน) ประกอบด้วยไขมัน โปรตีน และ สารสี เช่นเดียวกับเยื่อหุ้มผล ทำให้ข้าวกล้องมีสี มีส่วนของแป้งอยู่เล็กน้อย

2.3 นิวเซลลัส (nucellus) เป็นเซลล์ชั้นที่ติดกับเยื่อหุ้มเมล็ด แต่พันธะระหว่าง นิวเซลลัสกับเยื่อหุ้มเมล็ดไม่ติดกันแน่น จึงแยกจากกันได้ง่าย มีความหนาประมาณ 0.8-2.5 ไมครอน

2.4 เยื่อออโรน (aleurone layer) เป็นส่วนที่ห่อหุ้มเอ็นโดสเปิร์มและคัพภะ ประกอบด้วยเซลล์จำนวน 1-7 เซลล์ ด้านหลังเมล็ดมีความหนามากกว่าด้านอื่น ความหนาของส่วนนี้แตกต่างกันตามสายพันธุ์ของข้าว เยื่อออโรนนี้จะไม่ติดกับคัพภะในส่วนของใบเลี้ยงด้านท้องของ เมล็ดลงมาถึงจุดเชื่อมระหว่างใบเลี้ยงกับเยื่อหุ้มรากอ่อน ซึ่งอยู่ข้างในของเมล็ด จึงแบ่งลักษณะของ เซลล์ออโรนเป็น 2 ลักษณะคือส่วนที่ห่อหุ้มรอบเนื้อของเมล็ดจะมีรูปร่างเป็นลูกบาศก์ และมีไซโตพลาสซึม (cytoplasm) อยู่หนาแน่น ในเซลล์ยังมีกลุ่มโปรตีนที่มีรูปร่าง (protein bodies) กลุ่มไขมัน (lipid bodies) และสารอื่น ๆ เช่น นิวเคลียส (nucleus) ไมโครบอดี (microbodies) ไมโทคอนเดรีย (mitochondria) เอ็นโดพลาสซึม เเรทิกูลัม (endoplasmic reticulum) เวสิเคิล (vesicle) และพลาสติด (plastids) เป็นต้น ส่วนเซลล์แอลิวโรนที่ห่อหุ้มคัพภะจะบาง ไซโทพลาสซึม น้อย รูปร่างยาว มีกลุ่มไขมัน และกลุ่มโปรตีนน้อย มีเวสิเคิลมาก เป็นต้น ส่วนผนังเซลล์จะมี โปรตีน เสมิเซลลูโลส และเซลลูโลสที่ประกอบด้วย

2.4.1 คัพภะหรือเชื้อชีวิตจะอยู่ที่โคนเมล็ดด้านเปลือกใหญ่ ส่วนท้องของ เมล็ดมีส่วนประกอบเป็นรากอ่อน (radicle) ต้นอ่อน (plumule) เยื่อหุ้มรากอ่อน (coleorhiza) เยื่อ หุ้มต้นอ่อน (coleoptile) ท่อน้ำท่ออาหาร (epiblast) และใบเลี้ยง (scutellum) ซึ่งเป็นใบเลี้ยงเดี่ยว คัพภะเป็นแหล่งสะสมอาหารสำหรับการเจริญเติบโตของต้นอ่อน จึงอุดมไปด้วยโปรตีนและไขมันใน ส่วนต่าง ๆ

2.4.2 ส่วนที่เป็นแป้งหรือเอ็นโดสเปิร์ม (starchy endosperm) จะมีแบ่งเป็น องค์ประกอบหลักประมาณร้อยละ 78-80 ความชื้นร้อยละ 14 โปรตีนร้อยละ 6-8 และยังมีไขมัน ปริมาณเล็กน้อย เซลล์เม็ดแป้งเป็นรูปหกเหลี่ยม แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนชั้นซับออโรน (subaleurone layer) เป็นเซลล์ 2 ชั้นอยู่ถัดจากชั้นออโรน และส่วนที่เป็นสตาร์ชในเนื้อของเมล็ด (starchy endosperm) ในชั้นซับออโรนจะมีกลุ่มโปรตีนอยู่ภายใน 3 ลักษณะ คือ ลักษณะกลมใหญ่ (ขนาด 1-2 ไมครอน) กลมเล็ก (ขนาด 0.5-0.75 ไมครอน) และเป็นผลึกติดกันขนาด 2-3.5

ไมครอน แต่ในส่วนเนื้อของเมล็ดจะมีกลุ่ม โปรตีนลักษณะกลมใหญ่เท่านั้น แทรกอยู่ในระหว่าง เมล็ดสตาร์ช (starch granules) มีขนาด 3-9 ไมครอน ที่มีอยู่มากอัดแน่นรวมกันเป็นกลุ่มของเม็ด สตาร์ช (compound granules) อยู่ในเซลล์พารენไคมา (parenchyma cells) ที่มีผนังเซลล์บาง มี รูปร่างรี หรือสี่เหลี่ยม เข้าสู่ใจกลางเมล็ด โดยด้านนอกของเมล็ดจะรี และยาวมากกว่าด้านในของเมล็ด

รำข้าว (rice bran)

รำข้าวเป็นผลพลอยได้จากการสีข้าว เป็นเยื่อสีน้ำตาลอ่อนที่หุ้มด้านในติดเมล็ดข้าวที่ถูก ขัดออกระหว่างกระบวนการสีข้าวเปลือกซึ่งจะได้ประมาณ 8-10% ของน้ำหนักข้าวเปลือก รำข้าว สามารถแบ่งออกได้หลายชนิด เช่น รำหยาบ รำละเอียด นอกจากนี้ยังมีการนำรำละเอียดไปทำการ สกัดน้ำมันรำข้าว กากที่เหลือเรียกว่า “กากรำ” หรือรำสกัดน้ำมัน (defatted rice bran) พบว่า ประเทศไทยสามารถผลิตข้าวได้ประมาณปีละ 20-22 ล้านตัน ซึ่งสีเป็นข้าวสารได้ประมาณ 16 ล้าน ตัน และได้รำข้าว 1.12 ล้านตัน โดยข้าว 1 ตันจะให้รำข้าวประมาณ 70 กิโลกรัม

(<http://www.kmutt.ac.th/rippc/oryzanol.htm>, 2008)

รำหยาบ เป็นส่วนของเปลือกชั้นนอกติดกับเมล็ดข้าว (bran) ส่วนของจมูกข้าว (germ) ส่วนของปลายข้าว (broken rice) ส่วนของเมล็ดข้าว (endosperm) และอาจมีส่วนของแกลบปนมา บ้าง รำหยาบมีเยื่อใยและซิลิกาค่อนข้างสูง มียอดโภชนะย่อยได้ประมาณ 72% มีโปรตีนรวม ประมาณ 7-8% เยื่อใยประมาณ 13% และมีไขมันประมาณ 13%

รำละเอียด ประกอบด้วยเยื่อหุ้มเมล็ดข้าว ปลายข้าวและมีแกลบปนเล็กน้อย มียอด โภชนะย่อยได้ประมาณ 86% มีโปรตีนประมาณ 12% มีไขมันค่อนข้างสูงประมาณ 12-13% ทั้งนี้ ขึ้นกับคุณภาพ ชนิดของสายพันธุ์ข้าวเปลือก

ตาราง 1 ชนิดและปริมาณสารอาหารในรำข้าว

องค์ประกอบ	ปริมาณ (%w/w)
โปรตีน	15
ไขมัน	15-30
คาร์โบไฮเดรต	50
เส้นใย	6-20

ที่มา : คัดแปลงจาก บังอร ศรีพานิชกุลชัย และคณะ (2548 : 4-9)

ตาราง 2 ปริมาณสารอาหารที่มีผลออกฤทธิ์ต่อสุขภาพในรำข้าว

ชนิด	ปริมาณ (ppm)
Phytosterol	2230-4400
γ -oryzanol	2200-3000
Tocopherol, Tocotrienol	210-440
Polyphenol	305-309
Phytic acid	1500-1700

ที่มา : Qureshi และคณะ (2002 : 175-187)

ข้าวเหนียวดำ

ข้าวเหนียวดำเป็นข้าวมีสีจัดอยู่ในวงศ์ Gramineae มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Oryza sativa* L. ข้าวเหนียวดำในภาษาพื้นเมืองของทางเหนือและตะวันออกเฉียงเหนือเรียกว่า “ข้าวดำ” ตามลักษณะสีของเมล็ดที่มีสีแดงเข้ม คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ได้เริ่มรวบรวมและอนุรักษ์ พันธุ์กรรมข้าวดำพื้นเมืองของไทย ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2539 ได้ทำงานวิจัยในเชิงวิทยาศาสตร์เกษตร จนกระทั่งได้รับอนุมัติจากมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ให้จัดตั้งเป็น “หน่วยวิจัยข้าวดำ” (Purple Rice Research Unit ; PRRU) อยู่ภายใต้การดูแลของสถาบันวิจัยวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปัจจุบันสามารถรวบรวมพันธุ์กรรมข้าวดำพื้นเมืองได้ 42 สายพันธุ์ จากแหล่งปลูกข้าวทั่วไทย ทั้งในสภาพของข้าวนาดำและข้าวนาไร่ มีพันธุ์ปรับปรุงที่ได้รับการรับรองตาม พรบ. พันธุ์พืช พ.ศ. 2518 โดยกองคุ้มครองพันธุ์พืช กรมวิชาการเกษตร จำนวน 2 พันธุ์ คือ พันธุ์ดำคอยสะเก็ด (Kum Doisaket) และพันธุ์ดำอมก๋อย (Kum Omkoi) (ดำเนิน กาละดี. 2545)

สารที่มีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระในข้าวเหนียวดำ

วิตามินอี

1. โทโคเฟอรอล (tocopherols)

โทโคเฟอรอลในธรรมชาติที่สำคัญมี 4 ชนิด คือ แอลฟาโทโคเฟอรอล

(α -tocopherol) เบต้าโทโคเฟอรอล (β -tocopherol) แกมมาโทโคเฟอรอล (γ -tocopherol) และ เดลต้าโทโคเฟอรอล (δ -tocopherol) โดยตัวที่มีฤทธิ์ของวิตามินมากที่สุดและนำมาใช้ในการแพทย์คือ แอลฟาโทโคเฟอรอล ซึ่งโครงสร้างประกอบด้วย 2 ส่วนคือส่วนวงแหวนโครมานอล เป็นส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) ซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิลเกาะอยู่จึงสามารถให้โปรตอนกับสารอนุมูลอิสระได้และส่วนของสายคาร์บอน (side chain) เป็นส่วนที่ชอบไขมัน (hydrophobic)

โทโคเฟอรอลมีลักษณะเป็นน้ำมันสีเหลือง ละลายได้ดีในไขมัน รูปที่พบในธรรมชาติ (form) มีชื่อเฉพาะว่า โทโคเฟอรอล (tocopherol) ซึ่งมีโครงสร้างแตกต่างกันประมาณ 6-7 แบบ ส่วนที่ออกฤทธิ์ดีที่สุดคือ แอลฟาโทโคเฟอรอล (α -tocopherol) รูปแบบสารแอลฟาโทโคเฟอรอลมี 2 แบบคือ d- α -tocopherol เป็นชนิดที่ได้จากธรรมชาติ และ dl- α -tocopherol ได้จากการสังเคราะห์ ซึ่งทั้งสองแบบนี้ให้ผลที่ไม่แตกต่างกันมากนัก

โครงสร้างของโทโคไตรอินอลสามารถแบ่งได้ 4 รูปแบบ จำแนกตามจำนวนและตำแหน่งการแทนที่ของหมู่เมทิล ในวงแหวนโครมานอล (chromanol) ที่อยู่ในโมเลกุล (Setiadia, 2003 : 11-26) ได้แก่

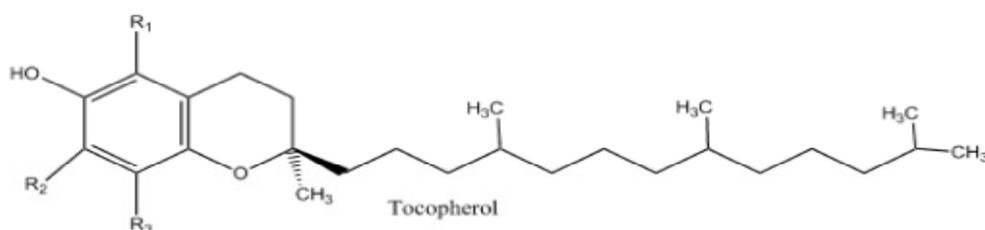
α - tocopherol มีหมู่เมทิลจำนวน 3 หมู่ จับที่ตำแหน่ง 5, 7 และ 8 ของวงแหวน

β - tocopherol มีหมู่เมทิลจำนวน 2 หมู่ จับที่ตำแหน่ง 5 และ 8 ของวงแหวน

γ - tocopherol มีหมู่เมทิลจำนวน 2 หมู่ จับที่ตำแหน่ง 7 และ 8 ของวงแหวน

δ - tocopherol มีหมู่เมทิลจำนวน 1 หมู่ จับที่ตำแหน่ง 8 ของวงแหวน

โดย R_1 , R_2 , R_3 แทนหมู่เมทิลที่เกาะ ณ ตำแหน่งที่ 5, 7 และ 8 ของวงแหวน



ภาพประกอบ 1 โครงสร้างของโทโคเฟอรอล

ที่มา : Setiadia (2003 : 11-26)

2. โทโคไตรอีนอล (Tocotrienols)

โทโคไตรอีนอล (Tocotrienol) เป็นวิตามินอีชนิดหนึ่งที่พบในธรรมชาติมีทั้งหมด 4 รูปแบบ ซึ่งประกอบด้วย α -, β -, γ - และ δ -tocotrienol โครงสร้างของโทโคไตรอีนอลจะคล้ายคลึงกับโทโคเฟอรอล คือจะประกอบด้วยวงแหวนโครมานอล (chromanol) และโครงสร้างของโซ่ในตำแหน่งที่ 2 ที่เหมือนกันแต่จะต่างกันในส่วนของโซ่ข้าง (side chain) โดยโทโคเฟอรอลที่ต่ออยู่กับวงแหวนโครมานอล (chromanol) จะมีโซ่ที่มีความอึดตัวที่เรียกว่า โซ่ไฟติล (phytyl side chain) ในขณะที่โทโคไตรอีนอล จะมีโซ่ที่ไม่อึดตัวเรียกว่าโซ่ไอโซพรีนอยด์ (isoprenoid side chain) ยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะคู่ที่ตำแหน่ง 3, 7 และ 11 ซึ่งโครงสร้างในส่วนนี้ของโซ่ข้างที่แตกต่างกันนี้ทำให้โทโคไตรอีนอลมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระได้ดีกว่าหรือสามารถให้ไฮโดรเจนในหมู่ไฮดรอกซิลได้ดีกว่าโทโคเฟอรอล โดยที่แกมมาและเดลต้าโทโคไตรอีนอลมีประสิทธิภาพมากกว่าแอลฟาโทโคไตรอีนอล (Chen and others. 2005 : 319-331) โครงสร้างของโทโคไตรอีนอล ยังสามารถแบ่งได้ 4 รูปแบบ ตามจำนวนและตำแหน่งการแทนที่ของหมู่เมทิล (methyl group) ในวงแหวนโครมานอล (chromanol) ที่อยู่ในโมเลกุล (Setiadia. 2003 : 11-26) ดังนี้

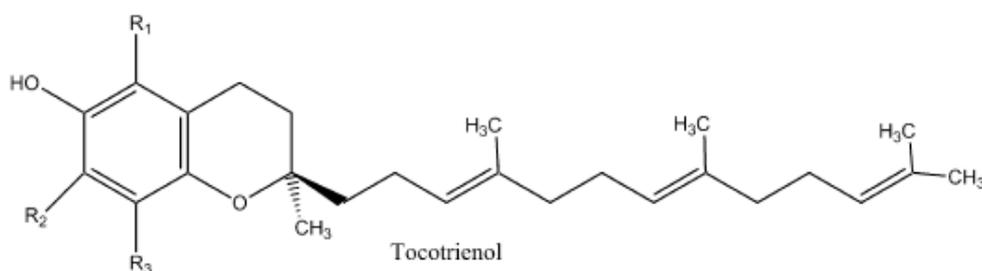
α -tocotrienol มีหมู่เมทิลจำนวน 3 หมู่ จับที่ตำแหน่ง 5, 7 และ 8 ของวงแหวน

β -tocotrienol มีหมู่เมทิลจำนวน 2 หมู่ จับที่ตำแหน่ง 5 และ 8 ของวงแหวน

γ -tocotrienol มีหมู่เมทิลจำนวน 2 หมู่ จับที่ตำแหน่ง 7 และ 8 ของวงแหวน

δ -tocotrienol มีหมู่เมทิลจำนวน 1 หมู่ จับที่ตำแหน่ง 8 ของวงแหวน

โดย R_1 , R_2 , R_3 แทนหมู่เมทิลที่เกาะ ณ ตำแหน่งที่ 5, 7 และ 8 ของวงแหวน



ภาพประกอบ 2 โครงสร้างของโทโคไตรอีนอล

ที่มา : Setiadia (2003 : 11-26)

วิตามินอีมีความสำคัญอย่างมากต่อสุขภาพ แทรกอยู่ในไขมันของเยื่อหุ้มเซลล์ สามารถป้องกันการเสื่อมเสียของเซลล์และลดความเป็นพิษของสารเคมีและรังสีที่มาจากภายนอก เซลล์ซึ่งทำให้เกิดสารอนุมูลอิสระ (free radicals) และเปอร์ออกซิเดชันของกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวได้ วิตามินอีช่วยในการป้องกันการทำลายเม็ดเลือดแดงในเด็กที่เพิ่งคลอด ป้องกันโรคตับแข็ง ช่วยการทำงานของกล้ามเนื้อหัวใจและป้องกันสภาวะกล้ามเนื้อลีบ ป้องกันการเป็นหมันและการแท้ง และอาจทำให้เซลล์แก่ช้าลง โดยมีคุณสมบัติเด่นคือ เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ เป็นตัวจับอนุมูลอิสระ ช่วยขัดขวางการสังเคราะห์คอเลสเตอรอล และสามารถลดปริมาณคอเลสเตอรอลในพลาสมาและยังสามารถลดปริมาณไขมันและสารที่ไม่ใช่ไขมันอันเป็นสาเหตุของการเกิดโรคหัวใจได้ นอกจากนี้โทโคไตรอีนอลจะเป็นสารต้านอนุมูลอิสระแล้ว ยังมีความสามารถต้านการเกิดเนื้องอกซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดโรคมะเร็งอีกด้วย (Kanaya and others. 2004 : 157-160)

แกมมาออริซานอล

โดยทั่วไปภายในโครงสร้างของแกมมาออริซานอล (γ -oryzanols) ประกอบด้วยองค์ประกอบที่สำคัญ 2 ส่วนคือ กรดเฟอร์ูลิก (ferulic acid) และ สเตอรอล (sterol) ที่ต่อกันด้วยพันธะเอสเทอร์ เป็นสารประกอบที่ภายในโครงสร้างมีหมู่ไฮดรอกซิลที่ทำหน้าที่เป็นตัวยับยั้งสารอนุมูลอิสระ ซึ่งสารแกมมาออริซานอลเป็นกลุ่มของสารประกอบสเตอริลเฟอร์ูเลท (steryl ferulate) โดยโครงสร้างทางเคมีจะแตกต่างกันที่กลุ่มของสเตอรอล (sterol group) ที่มาต่อกับกรดเฟอร์ูลิก ในปัจจุบันพบว่าแกมมาออริซานอลทั้งหมด 10 ชนิด (Parrado and others. 2006 : 742-748) ได้แก่ Δ^7 stigmastanyl ferulate, stigmasteryl ferulate, cycloartenyl ferulate, 24-methylene cycloartanyl ferulate, Δ^7 -campestenyl ferulate, campesteryl ferulate, Δ^7 -sitostenyl ferulate, sitosteryl ferulate, sitostanyl ferulate, campestanyl ferulate ในจำนวน 10 ตัวนี้มี 3 ตัวที่มีความสำคัญในการออกฤทธิ์ด้านการเกิดออกซิเดชันและมีปริมาณมากกว่าตัวอื่น เป็นที่สนใจมากในการนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพ ได้แก่ cycloartenyl ferulate, 24-methylene cycloartanyl ferulate และ campesteryl ferulate

แกมมาออริซานอลมีลักษณะเป็นผงสีขาวหรือสีขาวออกเหลือง ไม่มีกลิ่น สามารถละลายได้ในไขมัน น้ำมัน และตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น คลอโรฟอร์ม อีเทอร์ เฮปเทน เมทานอล เป็นต้น แต่ไม่ละลายในน้ำ มีคุณสมบัติในการออกฤทธิ์ต่อสุขภาพ ซึ่งปัจจุบันมีการนำแกมมาออริซานอลไปใช้เป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพและเครื่องสำอาง โดยเชื่อว่ามีคุณสมบัติที่สามารถปกป้องผิวหนังจากแสงแดด ช่วยป้องกันการเกิดริ้วรอยเหี่ยวย่นของผิวหนัง นอกจากนี้สามารถยังป้องกันโรคเรื้อรังที่เกิดจากการมีระดับคอเลสเตอรอลสูง เนื่องจากปริมาณของแกมมาออริซานอลที่พบในรำข้าวนั้นสูงกว่าสารอื่น ๆ (เทียบแล้วสูงกว่าวิตามินอีถึง 10 เท่า) (บังอร ศรีพานิชกุลชัย และคณะ. 2548 : 4-9)

สารประกอบฟีนอล

สารประกอบฟีนอล (phenolic compound) ในอาหารจัดเป็น secondary metabolites ส่วนในพืช มีลักษณะโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวนอะโรมาติก (aromatic ring) โดยส่วนมากเป็น หมู่ไฮดรอกซิลมาเกาะหนึ่งหมู่หรือมากกว่าหนึ่งหมู่จึงเป็นอนุพันธ์ของฟีนอล โดยสามารถพบ สารประกอบฟีนอลได้ทั่วไปที่เป็นโพลีเมอร์ (polymeric) และสารประกอบลิกนินที่ไม่สามารถ ละลายได้ในน้ำ (insoluble lignins) ซึ่งพบได้มากในเนื้อเยื่อของพืช สารประกอบฟีนอลในอาหาร ส่วนมากจะละลายในน้ำได้เล็กน้อยและสามารถละลายได้ดีในสารละลายอินทรีย์ พืชส่วนมากจะมี โพลีฟีนอลที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดและบริเวณที่เพาะปลูก ฟีนอลในอาหารส่วนใหญ่จะอยู่ในรูป ของกรดฟีนอลิก (phenolic acids) ฟลาโวนอยด์ (flavonoids) ลิกแนน (licnans) สติลบีน (stillbenes) คูมาริน (coumarins) และแทนนิน (tannins) จากคุณสมบัติต่าง ๆ ของสารประกอบ ฟีนอลที่มีในอาหารนั้นมีความสำคัญต่ออาหารหรือผลิตภัณฑ์อาหาร โดยสามารถสร้างความคงตัวต่อ การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นในอาหาร และช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในอาหาร ซึ่งการเติมสารประกอบฟีนอลเข้าไปในอาหารก็เพื่อคุณค่าทางชีวภาพ โดยใช้เป็นสารต้านปฏิกิริยา ออกซิเดชันได้ทั้งในอาหารและในร่างกาย และยังมีส่วนในการป้องกันการกลายพันธุ์ของเซลล์หรือ สาเหตุที่ทำให้เกิดโรคมะเร็งนั่นเอง โดยในพืชหลาย ๆ ชนิดซึ่งรวมถึงธัญพืชจะมีสารประกอบฟีนอล หลายชนิดที่ทำหน้าที่ในการบำบัดรักษาโรคต่าง ๆ ได้ สารประกอบฟีนอลที่พบในข้าวมีปริมาณ 197-376 ไมโครกรัมต่อกรัม สารประกอบฟีนอลที่พบ เช่น กรดเฟอร์ูลิก (ferulic acid) คูมาริก (p-coumaric acid) แกลลิก (gallic acid) วานิลลิก (vanillic acid) คาเฟอิก (caffeic acid) และ ไชรินจิก (syringic acid) (Dykes and Rooney, 2007 : 105-111)

กรดไฟติก/ไฟเตท

กรดไฟติก หรือ ไฟเตท หรือ myo-inositol hexakis dihydrogen phosphate เป็น อนุพันธ์ของอินโนซิทอล (inositol) ที่อยู่ในรูปอินโนซิทอลฟอสเฟต (inositol phosphate) ถูกค้นพบ ครั้งแรกในปี ค.ศ. 1914 โดย Anderson (Grases and others, 2002 : 1535-1546) เป็น โครงสร้างของโมเลกุลที่ประกอบด้วยกลุ่มของฟอสเฟต (phosphate group) ซึ่งเกิดจากการยึดกัน ระหว่างอ็อกซิเจนของฟอสฟอรัส 1 อะตอม กับอ็อกซิเจนของออกซิเจน 4 อะตอม โดยมีออกซิเจน 1 อะตอม เป็นพันธะคู่กับฟอสฟอรัส และอ็อกซิเจนออกซิเจนที่อยู่ตรงข้ามที่จับอยู่กับอ็อกซิเจนของคาร์บอน ซึ่งเป็นโมเลกุลของโครงสร้างวงแหวนอินโนซิทอล (inositol) ทำให้อ็อกซิเจนของออกซิเจนที่อยู่อีก 2 ด้าน จับกับฟอสฟอรัสเป็นพันธะเดี่ยวและอยู่ในสภาพที่จะรับอ็อกซิเจนจากธาตุอื่น โดยกรดไฟติกมี ฟอสฟอรัสคิดเป็น 28.2% ของน้ำหนักโมเลกุล

กรดไฟติกทำหน้าที่เป็นแหล่งสะสมของฟอสฟอรัสในเมล็ดพืช พืชตระกูลถั่วและเมล็ด พืชน้ำมัน โดยพบฟอสฟอรัสมากกว่า 70% อยู่ในรูปของไฟติก (Garcia-Esteva and others, 1999

: 217-221) กรดไฟติกมีปริมาณเล็กน้อยในพืชหัวใต้ดิน ในธัญพืชพบว่ามีการไฟติกสูงถึง 1-2% ของน้ำหนักเมล็ด และอาจสูงถึง 3-6% ของน้ำหนักเมล็ด แหล่งของกรดไฟติกพบในจมูกข้าวโพด 90% ในขณะที่ข้าวสาลีและข้าวจะกระจายอยู่ในส่วนของเพอริคาร์พและชั้นออลิวโรน (Febles and others. 2002 : 19-23) กรดไฟติกเป็นกรดอิสระ (free acid) ส่วนไฟเตท (phytate) อยู่ในรูปของเกลือไฟเตทจับอยู่กับกลุ่มแร่ธาตุที่มีประจุบวก เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก และสังกะสี (Centeno and others. 2001 : 3208-3215) จึงมีผลต่อการนำไปใช้ประโยชน์ได้ของแร่ธาตุ ทำให้มนุษย์ไม่สามารถดูดซึมแร่ธาตุไปใช้ประโยชน์และมีข้อจำกัดในการย่อยกรดไฟติก ซึ่งปัจจัยที่มีผลในการลดการดูดซึมแร่ธาตุไปใช้ ได้แก่ ไฟเตท องค์ประกอบเส้นใยอาหารและแทนนิน แต่อิทธิพลส่วนใหญ่ที่มีผลกับแร่ธาตุคือไฟเตท แต่บทบาทสำคัญในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ทำให้กรดไฟติกช่วยป้องกันโรคได้ เช่น โรคหลอดเลือดเลี้ยงหัวใจตีบตัน โรคมะเร็งลำไส้ และอื่น ๆ (Febles and others. 2001 : 19-23)

แอนโทไซยานิน

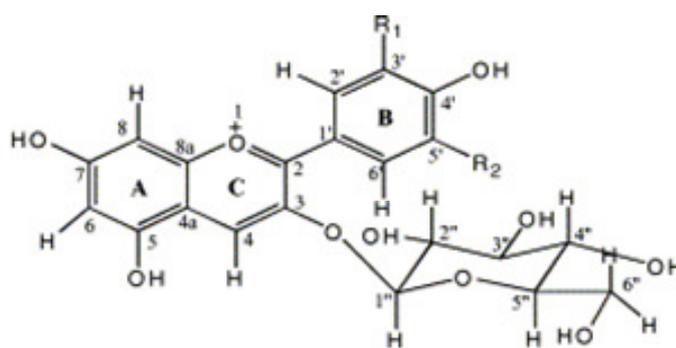
สารรงควัตถุ (pigments) ในข้าวได้จากการกระบวนการสังเคราะห์ฟลาโวนอยด์ในต้นข้าว ซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยสารกลุ่มแอนโทไซยานิน ได้แก่ พีลาโกนินิดิน (pelargonidin) ไซยานิดิน (cyaniding) เดลฟินิดิน (delphinidin) พีโอนินิดิน (peonidin) พีทูนินิดิน (petunidin) และมอลวิดิดิน (malvidin) นอกจากนี้ยังมีการสังเคราะห์สารกลุ่มโปรแอนโทไซยานิน (proanthocyanidin) ได้แก่ โปรไซยานินิดิน (procyanidin) (Yawadio and others. 2007 : 421-427)

แอนโทไซยานินเป็นสารประกอบในกลุ่มของฟลาโวนอยด์ (flavonoids) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์กลุ่มย่อยที่สำคัญของสารประกอบฟีนอล (phenols) ให้สีหลายเฉดสี ได้แก่ สีฟ้า สีน้ำเงิน สีม่วง จนถึงสีแดงเข้ม โดยละลายอยู่ในถุงแวคิวโอล (vacuole sap) ของพืช รงควัตถุกลุ่มนี้จะให้สีบนต้นข้าวแตกต่างกันไป ตั้งแต่สีชมพูจนถึงสีม่วงดำ และมีการกระจายของรงควัตถุไปตามส่วนต่าง ๆ ของต้นข้าวแตกต่างกันตามสายพันธุ์ ส่วนใหญ่จะพบรงควัตถุและให้สีในทุกส่วนของต้นข้าวที่เป็นลำต้นและใบ (vegetative part) และเกือบทุกส่วนของช่อดอก (floral part) ยกเว้นในส่วนของเอ็มบริโอ (embryo) หรือเอนโดสเปิร์ม (endosperm) ที่ไม่พบการกระจายของรงควัตถุ แอนโทไซยานินจะอยู่ในแวคิวโอลในเซลล์ ที่อยู่ในชั้นของอีพิดERMอลเซลล์ (epidermal cell) ของใบ ดอก และผลของพืช โครงสร้างของแอนโทไซยานินจะเปลี่ยนแปลงไป เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในแวคิวโอลเปลี่ยนไป แอนโทไซยานินสามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายที่มีขั้ว เช่น แอลกอฮอล์ และสามารถละลายได้ในน้ำ โดยทั่วไปแล้ว ลักษณะของการแสดงออกของสีในพืชจะเป็นการแสดงออกที่คงที่มากกว่าลักษณะพื้นฐานอื่น ๆ ที่เป็นลักษณะคุณภาพ (qualitative characters) ถึงอย่างไรก็ตามยังมีเงื่อนไขของสิ่งแวดล้อมที่มีอิทธิพลต่อการปรากฏของสี เช่น ระยะเวลา

ของการเจริญเติบโต (growth stage) อุณหภูมิ (temperature) หรือแสงอาทิตย์ (sunlight) ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีผลกระทบต่ออัตราการสังเคราะห์และการสลายตัวของแอนโทไซยานิน ทำให้ปริมาณแอนโทไซยานินและความเข้มของสีปรากฏเปลี่ยนไป (ดำเนิน กาละดี และคณะ. 2545)

โครงสร้างของแอนโทไซยานิน

แอนโทไซยานินมีโครงสร้างของโซ่คาร์บอนเป็น $C_6C_3C_6$ จึงจัดให้อยู่ในกลุ่มของฟลาโวนอยด์ ซึ่งสารแต่ละชนิดจะมีสีที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับหมู่ที่มาแทนที่ของวงแหวน A และ B ตามธรรมชาติจะพบในรูปของโพลีไฮดรอกซีเลท (polyhydroxylated) และเมทอกซีเลทเฮเทอโรไซด์ (methoxylated heterosides) โดยเป็นอนุพันธ์ของฟลาวิลียมไอออน (flavylium ion) หรือ 2-phenylbenzopyrylium ประกอบด้วยวงแหวนเบนโซไพแรน 2 วง เชื่อมต่อกับวงแหวนพิริล 1 วง เนื่องจากโมเลกุลของแอนโทไซยานินเป็นไกลโคไซด์ ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่เป็นน้ำตาลและส่วนที่เป็นอะไกลโคน (aglycone) เรียกว่า แอนโทไซยานิดิน (anthocyanidin) ซึ่งแยกออกจากกันได้โดยการไฮโดรไลซิสด้วยกรด ในเนื้อเยื่อพืชจะไม่พบอะไกลโคนอยู่ในรูปอิสระ จะพบเฉพาะที่อยู่ในรูปไกลโคไซด์ คือรวมตัวกับน้ำตาลเท่านั้น น้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบภายในโมเลกุลของแอนโทไซยานินส่วนใหญ่ที่พบ ได้แก่ กลูโคส กาแลคโตส อะราบีโนส ไซโลส (นิธิยา รัตนাপนนท์. 2545 : 244-345) การมีหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl groups) จากส่วนที่เป็นน้ำตาลอยู่ในวงแหวนทำให้สารประกอบมีความสามารถในการละลายน้ำรวมทั้งเอทานอล และเมทานอลได้ดี ส่วนหนึ่งของน้ำตาลจะต่อกับตำแหน่งที่ 3 ของแอนโทไซยานิดินและเมื่อมีการเติมน้ำตาลเข้าไป น้ำตาลเหล่านี้จะไปจับแอนโทไซยานิดินในตำแหน่งที่ 5 และ/หรือ 7 และส่วนน้อยจะจับที่ตำแหน่ง 3' กับ 5' ซึ่งน้ำตาลอาจถูกแทนด้วยอะลิฟาติก (aliphatic) ไฮดรอกซีเบนโซอิก (hydroxybenzoic) หรือไฮดรอกซีซินนามิก (hydroxycinnamic acids) ซึ่งส่วนมากจะเป็นอะซีติก (acetic acid) มาโลนิก (malonic acid) คูมาริก (*p*-coumaric acid) และคาเฟอิก (caffeic acids) โครงสร้างเหล่านี้สัมพันธ์กับความคงตัวของแอนโทไซยานินซึ่งเกี่ยวกับการเป็นสารประกอบที่ทนต่อการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากการมีสารที่เข้าทำปฏิกิริยาเนื่องจากการขาดอิเล็กตรอนของฟลาวิลียมนิวคลีไอ (flavylium nuclei) ความคงตัวของแอนโทไซยานินจะเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนเมทอกซิล (methoxyls) ในวงแหวน B เพิ่มขึ้นและหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyls) ลดลง ดังนั้นแอนโทไซยานิดินในจำนวน 6 ชนิดที่เสถียรมากที่สุดคือมอลวิดิดิน (malvidin) ตามด้วยพีโอนิดิน (peonidin) เพทูนิดีน (petunidin) ไซยานิดิน (cyaniding) และเดลฟินิดิน (delphinidin) โดยทั่วไปแอนโทไซยานินจะเสถียรที่พีเอชมีความเป็นกรด นอกจากนั้นปฏิกิริยาการเติมน้ำตาล (glycosylation) และปฏิกิริยาการแทนที่ด้วยหมู่เอซิล (acylation) ของน้ำตาลจะมีความเสถียรมากขึ้น และชนิดของน้ำตาลที่เป็นน้ำตาลโมเลกุลคู่ (diglycerides) จะเสถียรมากกว่าในรูปของน้ำตาล



ภาพประกอบ 5 โครงสร้างทางเคมีของแอนโทไซยานิน
ที่มา : Escribano-Bailon และคณะ (2004 : 213-221)

ตาราง 3 ปริมาณแอนโทไซยานินในธัญพืชบางชนิด

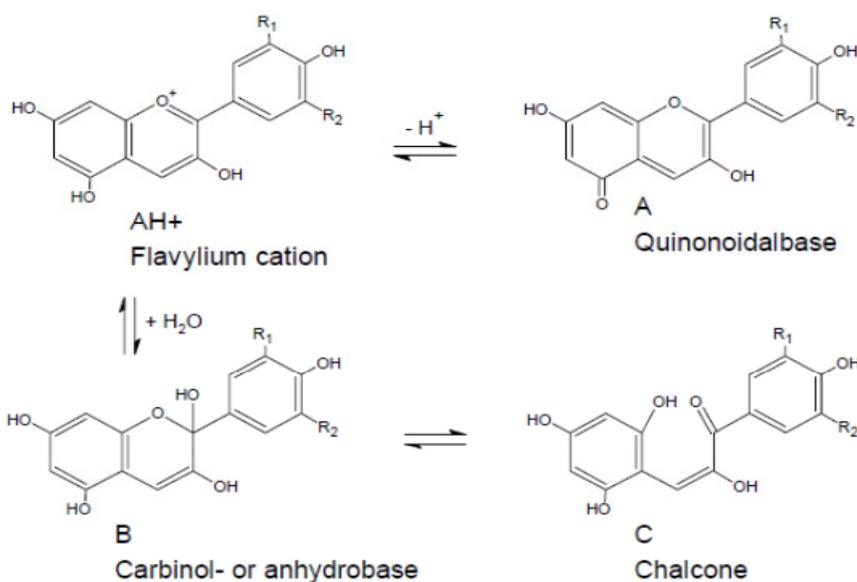
Sample	Amount ($\mu\text{g/g}$)
Blue barley	4
Maize:	
Pink	93
Red	558
Blue	225
Purple	965
Black rice	2,283
Black sorghum	944
Wheat:	
Blue	106-153
Purple	13-193

ที่มา : Dykes และ Rooney (2007 : 105-111)

เสถียรภาพของแอนโทไซยานิน

เนื่องจากการขาดอิเล็กตรอนของฟลาโวลีเทียมแคทไอออน (flavylium cation) จึงทำให้แอนโทไซยานินมีความไวต่อปฏิกิริยาสูงภายใต้สภาวะของการแปรรูปและสภาวะที่เก็บผลิตภัณฑ์เหล่านั้น (Yawadio and Morita. 2007 : 421-427) ซึ่งเป็นผลทำให้ได้สารประกอบซึ่งมีโครงสร้าง

และสีที่ไม่พึงประสงค์ บางครั้งอาจทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีน้ำตาล แต่การทำแห้งด้วยวิธีการพ่นฝอย (spray drying) หรือการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze drying) แล้วเก็บในที่แห้งและเย็นจะช่วยยืดอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ให้นานขึ้น ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสลายตัวของแอนโทไซยานิน เช่น ค่าพีเอชหรือความเป็นกรด-ด่าง (pH) โดยโครงสร้างของแอนโทไซยานินจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อค่าพีเอชเปลี่ยนไปเนื่องจากพีเอชมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลของแอนโทไซยานินเป็น 4 รูปแบบ ดังภาพประกอบ 6 คือถ้าอยู่ในรูป quinonoidal base (A) จะมีสีม่วง ถ้าอยู่ในรูปฟลาวิลียมแคทไอออน (AH^+) จะให้สีแดง แต่ถ้าเป็น carbinol pseudobase (B) และ chalcone (C) จะไม่มีสี ซึ่งจะพบว่าส่วนใหญ่ที่พีเอช 3 หรือต่ำกว่าจะให้สีแดง พีเอชเป็นกลางถึงด่างเล็กน้อย เช่น 8.5 จะให้สีม่วง แต่ถ้าเป็นด่างมาก ๆ เช่น ที่พีเอช 11 จะให้สีน้ำเงิน นอกจากนี้อุณหภูมิ ออกซิเจน น้ำตาล และแสงก็มีผลต่อความคงตัวของแอนโทไซยานินด้วย สำหรับการสกัดแอนโทไซยานินมักทำภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำโดยใช้ตัวทำละลายเมทานอลหรือเอทานอล ที่มีกรดปริมาณเล็กน้อยเพื่อให้อยู่ในรูปฟลาวิลียมแคทไอออน (flavilium cation form) ซึ่งมีสีแดงและมีความคงตัวสูงในสารละลายที่มีความเป็นกรด สำหรับการสกัดแอนโทไซยานินเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมอาหารมักใช้เอทานอลในการสกัดเนื่องจากมีความเป็นพิษน้อยกว่าเมทานอล แม้ว่าประสิทธิภาพการสกัดจะน้อยและยากต่อการกำจัดออกไปในภายหลังก็ตาม (Escribano-Bailon and others. 2004 : 217-221) โดย Duangmal และคณะ. (2008 : 1437-1445) ได้ทำการสกัดสารสีแอนโทไซยานินจากกระเจี๊ยบแดงใช้ตัวทำละลาย 95% เอทานอล : น้ำ อัตราส่วนเป็น 1:1 ปรับพีเอชเป็น 2.5 ด้วย กรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลาร์ ใช้อัตราส่วนของตัวอย่างต่อตัวทำละลายเป็น 1:5 เวลาในการสกัด 30 นาที สารสกัดที่ได้นำมาผ่านการกรองและเติมสารให้ความคงตัวแล้วทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze-dried) และ Luiz-Bordignon และคณะ. (2007 : 594-599) ได้สกัดสารสีแอนโทไซยานินจากองุ่น (Isabel grapes) ได้ทำการสกัดโดยใช้ผิวองุ่นแดง 100 กรัม เขย่าผสมกับเอทานอล : กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.5 นอร์มอล (85:15) 400 มิลลิลิตรที่ 40 องศาเซลเซียส ผ่านการกรองแล้วทำให้เข้มข้นโดยการระเหยตัวทำละลายออก



ภาพประกอบ 6 โครงสร้างทางเคมีของแอนโทไซยานินในสารละลายที่สภาวะสมดุล
ที่มา : Rein. (2005 : website)

ประโยชน์ของแอนโทไซยานิน

1. เป็นสารให้สีในอุตสาหกรรมอาหาร (natural food colorant)

ปัจจุบันสิ่งที่สำคัญปัจจัยแรก ที่ช่วยดึงดูดผู้บริโภคให้อยากซื้ออาหารมาบริโภค คือสีของอาหารที่มองเห็น ซึ่งจะทำให้ผู้บริโภคมีความรู้สึกอยากรับประทาน อย่างไรก็ตาม สีเป็นปัจจัยหนึ่งที่ใช้ในการบ่งบอกถึงคุณภาพของอาหารได้ นั่นคือ ถ้าอาหารนั้นมีสีที่มาจากสีธรรมชาติของอาหารเองจะทำให้ผู้บริโภคได้บริโภคอาหารที่มีคุณภาพดี มีความปลอดภัยยิ่งขึ้น บทบาทของแอนโทไซยานินจากพืชในการเป็นสารให้สีแก่อาหารเริ่มมีบทบาทสำคัญมากยิ่งขึ้น เพราะไม่เพียงแต่ให้ลักษณะที่ดีแก่อาหารทั้งในด้านความสวยงามและการประเมินด้านคุณภาพของอาหารแล้ว ยังมีประโยชน์ต่อสุขภาพมากกว่าการใช้สีสังเคราะห์อีกด้วย (Duangmal and others. 2008 : 1437-1445) แอนโทไซยานินถูกนำมาใช้เป็นสารให้สี (colorant) ในอาหารมากกว่า 120 ปีแล้ว โดยเริ่มแรกนำมาใช้ในไวน์ น้ำผักและผลไม้ต่างๆ ในประเทศสหรัฐอเมริกา มีส่วนผสมให้สี 26 ชนิดที่ได้รับอนุญาตให้ใช้ได้ในการอาหารโดยไม่จำเป็นต้องออกใบรับรอง โดยในจำนวนสีเหล่านี้จะมีส่วนผสมที่ให้แอนโทไซยานิน 4 ชนิด ได้แก่ สารสกัดจากผิวองุ่น (grape skin extract) สารสกัดสีองุ่น (grape color extract) น้ำผลไม้ (fruit juice) และน้ำผัก (vegetable juice) (Rosso and Mercadante. 2007 : 347-352) โดยใช้ในผลิตภัณฑ์น้ำผักและผลไม้ รวมถึงผลิตภัณฑ์ผักและผลไม้

แห่งด้วย กลุ่มสหภาพยุโรป (EU) ได้จัดสารให้สีที่เป็นอนุพันธ์ของแอนโทไซยานินเป็นสารให้สีธรรมชาติ (natural colorant) โดยแต่ในละประเทศจะมีการพิจารณาว่าแอนโทไซยานินจากแหล่งใดผ่านกระบวนการอะไรจึงจะได้รับอนุญาตให้ใช้ ซึ่งข้อกำหนดของแต่ละประเทศจะแตกต่างกันออกไป เช่น ประเทศนอร์เวย์ซึ่งเป็นสมาชิกของ EU ไม่อนุญาตให้ใช้สารให้สีสังเคราะห์ในอาหารเลย ส่วนกลุ่มในประเทศเอเชีย กลุ่มประเทศในอเมริกากลาง และอเมริกาใต้นั้นจัดให้สีที่เป็นอนุพันธ์ของแอนโทไซยานินเป็นสารที่เหมาะสมที่สุดในการใช้กับอาหาร (Wrolstad. 1997 : unpagel)

2. บทบาทในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant)

งานวิจัยส่วนใหญ่ในปัจจุบันมุ่งสนใจที่คุณประโยชน์ของแอนโทไซยานินที่มีผลต่อร่างกายเป็นหลัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ เนื่องจากในร่างกายของมนุษย์ทุกคนมีอนุมูลอิสระ (free radical) ที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ขึ้นในร่างกาย แอนโทไซยานินเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ทำงานได้ดีกว่าวิตามินอีถึง 5 เท่า เมื่อร่างกายได้รับสารนี้เพียงพอที่จะไปทำหน้าที่จับกับอนุมูลอิสระ (free radical) ที่ไปรบกวนระบบการทำงานของเซลล์ในร่างกาย ทำให้ร่างกายแข็งแรง สุขภาพดี รวมทั้งลดริ้วรอยอันเกิดก่อนวัย บำรุงผิวพรรณ จากความสามารถในด้านการเกิดออกซิเดชันหรือสามารถจับกับอนุมูลอิสระได้ (Kaneda and others. 2006 : 495-511)

3. บทบาทในการเป็นอาหารสุขภาพ (functional foods and nutraceuticals)

แอนโทไซยานินมีศักยภาพในการใช้เป็นอาหารเสริมสุขภาพ เพื่อป้องกันและลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคได้หลายชนิด เช่น สารสกัดแอนโทไซยานินจากข้าวเหนียวดำมีความสามารถในการป้องกันโรคที่เกิดจากความบกพร่องของเมตาบอลิซึมของร่างกาย โดยสารสกัดจะช่วยปรับปรุง lipid profile และเพิ่มความไวต่ออินซูลินได้เหมือนกับการให้ยาไพโอกลิตาโซน (pioglitazone) ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มกลิตาซา (glitazar) เป็นยาที่ใช้ในการรักษาโรคเบาหวานที่มีผลควบคุมทั้งระดับน้ำตาล (Guo and others. 2007 : 1-6) นอกจากนี้ยังช่วยลดระดับไขมันในเลือด สามารถช่วยป้องกันการเกิดการอุดตันในหลอดเลือด และยังเพิ่มระดับเอช-ดี-แอล คอเลสเตอรอล (HDL cholesterol) ซึ่งเป็นคอเลสเตอรอลชนิดดี รวมทั้ง apo A-I ให้สูงขึ้น ช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระและลดสารอนุมูลอิสระในหลอดเลือดได้ (Ling and others. 2001 : 1421-1426) และมีประโยชน์ในการป้องกันโรคที่เกี่ยวข้องกับภาวะเครียดออกซิเดชัน (oxidative stress) ในมนุษย์ สำหรับกลไกการออกฤทธิ์ของแอนโทไซยานินจากข้าวเหนียวดำต่อเซลล์มะเร็งดับ เกิดจากแอนโทไซยานินมีผลต่อการต้านออกซิเดชันผ่านการทำลายสารอนุมูลอิสระ Reactive Oxygen Species (ROS) และเหนี่ยวนำให้มีการเพิ่มกิจกรรมของเอนไซม์ที่ทำหน้าที่ด้านการเกิดออกซิเดชัน (antioxidant enzymes) ในเซลล์ตับที่เป็นมะเร็ง ในการทำลายของสารอนุมูลอิสระ มี

ผลทำให้สภาพของเซลล์อยู่ในภาวะเครียดออกซิเดชันลดลงหรือกลับมาสู่ภาวะสมดุล (Chiang and others. 2006 : 797-803) เนื่องจากปัจจุบันปัญหาสุขภาพของมนุษย์เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีหลายโรคที่มีสาเหตุมาจากการบริโภคอาหารที่ไม่ถูกสุขลักษณะ ทั้งโรคชนิดเรื้อรังและโรคแบบเฉียบพลัน อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันผู้บริโภคได้หันมาสนใจอาหารที่มาจากธรรมชาติหลายชนิดแทนการรักษาโรคภัยโดยการใส่สารเคมีสังเคราะห์ ผู้รักสุขภาพได้ให้ความสำคัญกับแนวทางการใช้ประโยชน์ของแอนโทไซยานินมากขึ้น เช่น ใช้เป็นส่วนผสมในอาหารเพื่อเพิ่มสีและเพิ่มคุณค่าต่อสุขภาพ ใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร โดยเฉพาะแนวโน้มการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพในอนาคต ทั้งนี้เพื่อให้ผู้รักสุขภาพทั้งหลายรู้สึกมีความมั่นใจเมื่อบริโภคอาหารนั่นเอง

สารที่นิยมใช้เป็นสารให้ความคงตัวในอาหาร

ทรีฮาโลส (trehalose)

ทรีฮาโลส คือน้ำตาลชนิดหนึ่งที่เป็นสารประกอบไดแซคคาไรด์ประเภทไม่มีปลายรีดิวซ์ (non-reducing sugar) ประกอบด้วยกลูโคส 2 โมเลกุล ที่จับกันด้วยพันธะ 1,1 - glucosidic เกิดขึ้นตามธรรมชาติหรือผลิตได้จากแป้งจากปฏิกิริยาการย่อยด้วยเอนไซม์ มีลักษณะเป็นผลึกของแข็งละลายน้ำได้ดี มีรสหวาน ในธรรมชาติพบได้ทั้งในพืชและสัตว์ แบคทีเรีย ยีสต์ รา สาหร่ายทะเล แมลงหลายชนิด เปลือกของสัตว์ทะเลพวกกุ้ง ปู รวมถึงอาหารหลายประเภท เช่น บริวเวอรี่ีสต์ ยีสต์ขนมปัง เบียร์ ไวน์ น้ำผึ้ง และเห็ด เป็นต้น คุณสมบัติเชิงหน้าที่ของทรีฮาโลสคือ สามารถทำหน้าที่เป็นสารให้ความคงตัว (stabilizer) ในอุตสาหกรรมอาหารเพื่อยืดระยะเวลาการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหาร โดยเฉพาะอาหารทะเลเพื่อให้มีลักษณะสดคล้ายของเดิมเมื่อมีการเติมสารชนิดนี้ในผลิตภัณฑ์ดังกล่าว หรือการใช้เป็นตัวจริงให้เอนไซม์อยู่ตัวหรือเก็บได้นาน เช่น ฟอสโฟฟรุกโตโคไลเนส โดยผสมในกระบวนการทำแห้งโดยใช้ความเย็น นอกจากนี้ยังสามารถทำหน้าที่เป็นตัวจริงป้องกันให้กับเซลล์พืชที่ต้องผ่านกระบวนการแช่แข็ง สามารถป้องกันการเสียหายของโปรตีน โดยเฉพาะอย่างยิ่งภายใต้สภาพเยือกแข็งหรืออุณหภูมิต่ำและป้องกันการสูญเสียน้ำระหว่างการทำละลาย โดยทรีฮาโลสที่ไปจับกับน้ำอิสระ (free water) ทำให้น้ำอิสระไม่เข้าไปมีผลต่อโครงสร้างของโปรตีนในระหว่างการแช่เยือกแข็ง ทำให้มีการสูญเสียน้ำอิสระภายหลังจากละลาย (thawing) ทรีฮาโลสมีคุณสมบัติที่หลากหลาย ใช้เป็นสารให้ความหวาน (sweetener) สารให้ความคงตัว (stabilizer) สารให้ความข้นหนืด (thickener) และสารเสริมกลิ่นรส (flavor enhancer) ใช้เป็นวัตถุปรุงแต่งในการถนอมอาหารโดยการแช่เยือกแข็ง (cryopreservation additive) ใช้ป้องกันเซลล์จากผลกระทบของการแช่เยือกแข็ง และการอบแห้งจึงเหมาะที่จะใช้กับผลิตภัณฑ์จำพวกปลาหรืออาหารทะเล เนื้อสัตว์ ผลิตภัณฑ์จากไข่ ขนมหวานและอื่น ๆ นอกจากนี้ยังสามารถช่วยลดกลิ่น

ควาในผลิตภัณฑ์อาหารทะเลและไก่ได้ โดยลดการเกิดไตรเมทิลเอมีน (trimethylamine) ซึ่งเป็นสาเหตุของกลิ่นควาในผลิตภัณฑ์ (สุธี วัฒนาผาคี. 2549 : เว็บไซต์)

ไซโคลเด็กซ์ทริน (cyclodextrin)

เป็นคาร์โบไฮเดรตที่ได้จากการย่อยแป้ง มีลักษณะเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวต่อกันเป็นวงตั้งแต่ 6-8 โมเลกุลโดยไม่มีปลายรีดิวซ์ น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่ต่อกันเป็นวงต่อกันด้วยพันธะ alpha-1,4 glucosidic ซึ่งโพรงด้านในมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) สามารถจับสารไม่มีขั้วได้ โดยมีคุณสมบัติช่วยดูดซับสารให้กลิ่นรสไว้ทำให้กลิ่นรสมีความคงตัวมากขึ้น ใช้จับรสขมของน้ำผลไม้ตระกูลส้ม และสามารถดักจับคอเลสเตอรอลในนมหรือไข่ได้ (กล้าณรงค์ ศรีรอดและเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2543 : 197-203)

มอลโตเด็กซ์ทริน (maltodextrin)

หมายถึงกลุ่มโมเลกุลใหญ่ของคาร์โบไฮเดรตที่สามารถถูกย่อยด้วยเอนไซม์กลุ่มอะไมเลสแล้วให้น้ำตาลมอลโตสได้ มอลโตเด็กซ์ทรินจัดเป็นผลิตภัณฑ์น้ำเชื่อมกลูโคสที่มีค่าสมมูลย์เด็กซ์โทรส (dextrose equivalent, DE) ต่ำกว่า 20 ผลิตได้จากการย่อยแป้งด้วยกรดหรืออะไมเลส ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นผงสีขาว ละลายน้ำได้ดี ไม่มีกลิ่นไม่มีรสหวาน จึงมีการนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอาหารหลากหลายประเภทโดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมอาหารและยา ดังนี้

1. การผลิตผงปรุงรส ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่มีการนำมอลโตเด็กซ์ทรินมาใช้ประโยชน์มากที่สุด มอลโตเด็กซ์ทรินจะทำหน้าที่จับสารปรุงรสที่อยู่ในรูปน้ำมันละลายช่วยให้การทำแห้งมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น เช่น กระบวนการทำแห้งแบบพ่นกระจาย (spray drying) ของน้ำมันที่มีกลิ่นรสจะถูกอิมัลซิไฟด์ในสารผสมของคาร์โบไฮเดรตและมอลโตเด็กซ์ทรินก่อนที่อุณหภูมิ 70-80 องศาเซลเซียส แล้วลดอุณหภูมิเป็น 50 องศาเซลเซียส ใส่น้ำมันลงไปให้อิมัลซิไฟด์เป็นเวลา 10 นาทีแล้วนำไปทำแห้งแบบพ่นกระจาย จะได้ผงปรุงรสที่แห้งและเก็บไว้ได้นาน

2. เป็นสารช่วยเพิ่มปริมาณในอาหาร (bulking agents) นิยมใช้มากเป็นอันดับสอง โดยจะใช้ในผลิตภัณฑ์ผสมที่แห้งเนื่องจากมีคุณสมบัติดูดความชื้นน้อย ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ ได้แก่ beverage mixes, ซอสปรุงรสสำเร็จรูป เป็นต้น หรือใช้มอลโตเด็กซ์ทรินเป็นสารตัวพา (carrier) ในสารสกัดยีสต์ (yeast extract) และสารสกัดมอลต์ (malt extract) เป็นต้น

3. ใช้ในทางการแพทย์ ใช้เป็นคาร์โบไฮเดรตในอาหารเด็กอ่อนทั้งในรูปของเหลวหรือผงแห้ง ใช้ผลิตยาเม็ด โดยใช้มอลโตเด็กซ์ทรินเป็นส่วนผสมที่ช่วยให้ผงยายึดเกาะกันเป็นเม็ด (binder) ในการผลิตยาเม็ดที่มีด้านนอกแข็งแต่นุ่มด้านใน

4. ใช้เป็นสารทดแทนไขมัน ของหวานและสารเคลือบอาหาร (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2543 : 197-203)

สีผสมอาหาร

สีของอาหารเป็นลักษณะแรกที่ได้รับทางประสาทสัมผัส ซึ่งผู้บริโภคใช้ในการเลือกและยอมรับอาหารนั้น ๆ โดยอาหารเกือบทุกชนิดตั้งแต่วัตถุดิบจนถึงผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีสีที่ยอมรับโดยผู้บริโภคแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสังคม ภูมิศาสตร์ ความชอบของสวยงาม และพื้นฐานของผู้บริโภค ซึ่งการยอมรับสีของอาหารแตกต่างกันขึ้นกับเชื้อชาติ นอกจากนี้ยังพบว่าสีของอาหารที่แปลกจะมีอิทธิพลต่อผู้บริโภคน้อยกว่าการเปลี่ยนสีไปจากที่ควรจะเป็น สีผสมอาหารเป็นวัตถุเจือปนอาหารชนิดหนึ่ง ซึ่งผู้ผลิตอาหารใช้ผสมลงไปในการปรุงแต่งอาหารนั้น ให้แลดูสวยงามหรือกลมกลืนลักษณะอาหารที่เสื่อมสภาพให้คล้ายสีของอาหารตามธรรมชาติ รวมทั้งการแต่งสีเพื่อช่วยให้ดูคล้ายอาหารที่มีคุณภาพสูง เช่น อาหารที่ใช้ไข่เป็นส่วนผสม ปรากฏว่าในการผลิตจริงใช้ไข่เพียงเล็กน้อยหรือไม่ได้ใส่เลย แต่ใช้สีเหลืองผสมลงไปให้เป็นสีของไข่

วัตถุประสงค์โดยทั่วไปของการใช้สีผสมอาหาร คือ (ลาวัลย์ ฉัตรวิรุพท์ และคณะ. ม.ป.ป. : เว็บบไซต์)

1. เพื่อแต่งสีผลิตภัณฑ์อาหารที่ไม่มีสี ได้แก่ เครื่องดื่มหรือเครื่องดื่มผง ลูกกวาด ไอศกรีม แยม เยลลี่ และอาหารว่าง เพื่อให้มีสีเป็นที่ดึงดูดใจผู้บริโภค
2. เพื่อแต่งสีผลิตภัณฑ์อาหารซึ่งอาจสูญเสียหรือเปลี่ยนไปมากในระหว่างกระบวนการผลิตหรือการเก็บรักษา ได้แก่ การใช้สีผสมอาหารเพื่อช่วยแต่งสีของ เบียร์ วิสกี้ น้ำเชื่อม และอาหารอบ
3. เพื่อแต่งสีผลิตภัณฑ์อาหารที่มีสีธรรมชาติแปรเปลี่ยนตามฤดูกาลและสภาพภูมิอากาศ เช่น การใช้สีผสมอาหารแต่งสีนม ซึ่งปกติมักมีสีแตกต่างกันมากโดยขึ้นกับฤดูกาล โดยนมในฤดูร้อนมักมีสีเหลืองเข้มกว่านมในฤดูหนาว อาจเนื่องมาจากปริมาณเบตาแคโรทีนในหญ้าที่วัวบริโภคในฤดูร้อนมากกว่าในฤดูหนาว เพื่อให้อาหารที่ผลิตออกมามีสีคงที่ตามมาตรฐานที่ผู้ผลิตได้กำหนดไว้ เพื่อให้ผู้ซื้อเกิดความเข้าใจผิดในเรื่องคุณภาพของอาหารที่ผลิตขึ้นมา

อาจกล่าวโดยสรุปได้ว่า การเติมสีในอาหารก็เพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์อาหารเป็นที่จดจำและมีลักษณะที่ดีที่ผู้บริโภคต้องการและยอมรับ การใช้สีเพื่อแต่งสีของอาหารต้องเลือกชนิดที่ปลอดภัยและใช้ในปริมาณที่ไม่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค โดยสีผสมอาหารที่ใช้ควรมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. ไม่ทำให้คุณสมบัติของอาหารเปลี่ยนไปในทางเลวลง
2. มีความอยู่ตัวในอาหาร
3. ไม่เกิดปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์อาหารและบรรจุภัณฑ์ที่ใช้
4. ง่ายต่อการใช้ในผลิตภัณฑ์

5. ราคาถูก

6. ให้ความเข้มของสีสูง

สีผสมอาหารโดยทั่วไป อาจแบ่งเป็น 2 พวกใหญ่ ๆ คือ (ลาวัลย์ นัทรวิรุพห์ และคณะ. ม.ป.ป. : เว็บไซต์)

1. สีธรรมชาติ ได้แก่ สีที่ได้จากการสกัดจากวัตถุดิบธรรมชาติผ่านการพิจารณาในเรื่อง ส่วนประกอบ กรรมวิธีการผลิต ความบริสุทธิ์และอื่น ๆ จนแน่ใจว่าปลอดภัยต่อการบริโภค

2. สีสังเคราะห์ หมายถึง สีอินทรีย์ที่ได้จากการสังเคราะห์ ซึ่งมีลักษณะถูกต้องตาม ข้อกำหนดและปลอดภัยต่อการบริโภค เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสีทั้ง 2 ประเภท พบว่าสีสังเคราะห์มี ราคาถูกกว่า ให้สีสดและสม่ำเสมอกว่า และให้สีในช่วงที่กว้างกว่า นอกจากนี้ยังมีขายทั้งในรูปแบบสี และสีผสมในรูปผง สารละลาย และสารละลายแขวนลอย ซึ่งสะดวกต่อการเลือกใช้กับอาหารชนิด ต่าง ๆ ดังนั้นผู้ใช้งานจึงนิยมใช้สีสังเคราะห์มากกว่าสีธรรมชาติ แม้ว่าสีธรรมชาติจะปลอดภัยต่อผู้บริโภค มากกว่าสีสังเคราะห์ก็ตาม โดยชนิดสีสังเคราะห์ที่อนุญาตให้ใช้ในอาหาร คือ

2.1 ประเภทสีแดงมี 3 สี ได้แก่

2.1.1 ปองโซ 4 อาร์ (Ponceau 4 R)

2.1.2 คาร์โมอีซีน หรือ เอโซรูบิน (Carmoisine or Azorubine)

2.1.3 เออร์โทรซีน (Erythrosine)

2.2 ประเภทสีเหลือง มี 3 สี ได้แก่

2.2.1 ตาร์ตราซีน (Tartrazine)

2.2.2 ซันเซต เยลโลว์ เอ็ฟ ซี เอ็ฟ (Sunset Yellow F C F)

2.2.3 ไรโบฟลาวิน (Riboflavin)

2.3 ประเภทสีเขียว มี 1 สี ได้แก่

2.3.1 ฟาสต์ กรีน เอ็ฟ ซี เอ็ฟ (Fast Green F C F)

2.4 ประเภทสีน้ำเงิน มี 2 สี ได้แก่

2.4.1 อินดิโกคาร์มีน หรืออินดิโกติน (Indigocarmine or Indigotine)

2.4.2 บริลเลียนท์ บลู เอ็ฟ ซี เอ็ฟ (Brilliant blue F C F)

ระบบการวัดค่าสี

ในการระบุลักษณะของสีหนึ่ง ๆ จะต้องประกอบด้วยค่า 3 ค่า ซึ่งแสดงลักษณะต่าง ๆ คือ (รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต. 2549 : 374-388)

1. ค่าสี (hue) หมายถึงสีที่ปรากฏ เช่น สีเขียว แดง น้ำเงิน เป็นต้น

2. ค่าความสว่าง (lightness) หมายถึงความสว่างของสี
3. ค่าความเข้มของสี (chroma) หมายถึงความสดสีหรือความเข้มของสี

องค์กรที่มีบทบาทสำคัญในการกำหนดมาตรฐานด้านสี คือ Commission International de l'Eclairage (CIE) หรือ International Commission on Illumination มีสำนักงานใหญ่อยู่ในประเทศฝรั่งเศส องค์กรนี้ได้กำหนดมาตรฐานการวัดสีซึ่งเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางในวงการศึกษาและการวิจัยคือ ระบบ CIE Lab scale ในระยะเริ่มแรก CIE ได้กำหนดสเกลการวัดสีเป็น X-Y-Z ซึ่งใช้บรรยายสีแดง (Red) เขียว (Green) และน้ำเงิน (Blue) แต่เนื่องจากระบบสีดังกล่าวไม่สามารถบรรยายถึงลักษณะความมืด-สว่างของสีได้ ต่อมา CIE ได้พัฒนาเป็นระบบ X-Y-L ซึ่งบรรยายถึงค่าสีแดง เขียว และความสว่าง (lightness) ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามระบบดังกล่าวก็ยังขาดส่วนที่บรรยายถึงค่าสีน้ำเงิน ดังนั้น CIE จึงได้พัฒนาระบบสีต่อมาจนเป็นระบบที่ยอมรับและใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันคือ ระบบ $L^*a^*b^*$ ซึ่งเป็นระบบการบรรยายสีแบบ 3 มิติ โดยที่แกน L^* จะบรรยายถึงความสว่าง (lightness) จากค่า $+L^*$ แสดงถึงสีขาว จนถึง $-L^*$ แสดงถึงสีดำ แกน a^* จะบรรยายถึงแกนสีจากเขียว ($-a^*$) ไปจนถึงแดง ($+a^*$) ส่วนแกน b^* จะบรรยายถึงแกนสีจากน้ำเงิน ($-b^*$) ไปเหลือง ($+b^*$) บริษัท Hunter lab ในอเมริกาก็เป็นอีกองค์กรหนึ่งซึ่งทำการวิจัยและพัฒนาการวัดสี จนในที่สุดได้ระบบของ Hunter lab เอง ซึ่งเรียกว่า การวัดสีระบบ Hunter lab scale ซึ่งบรรยายแกนใน 3 มิติเช่นเดียวกับระบบ CIE โดยที่ Hunter lab จะใช้สเกล L-a-b บรรยายลักษณะสีเช่นเดียวกับ $L^*a^*b^*$ ของ CIE แต่ระบบ CIE สามารถวัดค่าสีออกมาเป็นตัวเลขที่เข้าใจง่ายและค่าสีมีความสม่ำเสมอมากกว่าค่าสีในระบบ Hunter lab นอกจากนี้ CIE ยังมีการพัฒนาเป็นระบบ CIE L^*C^*h ระบบนี้พัฒนาขึ้นโดยแปลงค่าสี a^* และ b^* ในระบบ CIE $L^*a^*b^*$ ให้แสดงค่าในรูปค่าความเข้มสี (chroma, C^*) และค่ามุมของสี (hue angle, h) ซึ่งมีหน่วยเป็นองศา จาก 0-360 องศา โดย 0 องศา (สีแดง) อยู่บนแกน $+a^*$, 90 องศา (สีเหลือง) อยู่บนแกน $+b^*$, 180 องศา (สีเขียว) บนแกน $-a^*$, 270 องศา (สีน้ำเงิน) อยู่บนแกน $-b^*$ และที่มุม 360 องศา เท่ากับ 0 องศา โดยค่า L^* ยังเป็นค่าเดิมจากระบบ CIE $L^*a^*b^*$ คือค่าความสว่าง

สมการสำหรับคำนวณค่า L^* , C^* , h คือ

$$L^* = 116 (Y/100)^{1/3} - 16$$

$$C^* = [(a^*)^2 + (b^*)^2]^{1/2}$$

$$h_{ab} = \arctan (b^*/a^*)$$

เมื่อ C^* คือ ค่าความเข้มของสี

L^* คือ ค่าความสว่าง

h_{ab} คือ hue angle

เนื่องจากผู้ผลิตไม่ได้ต้องการทราบเพียงค่าสีของผลิตภัณฑ์เท่านั้นแต่ต้องการทราบว่าสีของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตในรุ่นหนึ่ง ๆ นั้น ตรงตามที่มาตรฐานกำหนดหรือไม่ และผู้ผลิตควรจะยอมรับผลิตภัณฑ์ในรุ่นนั้นหรือไม่ ดังนั้นผู้ผลิตจึงต้องการทราบค่าความแตกต่างของสีระหว่างผลิตภัณฑ์และมาตรฐาน การวัดค่าความแตกต่างของสีคือการวัดค่าความแตกต่างของสีตัวอย่างและสีมาตรฐานออกมาเป็นตัวเลข ซึ่งมีประโยชน์ในการนำค่าความแตกต่างของสีมาใช้ในการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยเปรียบเทียบคุณภาพด้านสีของผลิตภัณฑ์กับมาตรฐาน ช่วยในการปรับเปลี่ยนด้านวัตถุดิบและกระบวนการผลิตเพื่อปรับปรุงผลิตภัณฑ์ที่มีสีไม่ได้มาตรฐานให้ได้มาตรฐานได้ทันที เป็นต้น โดยมีการหาค่าความแตกต่างของสีทั้งหมด (ΔE^*) ใช้แทนค่าความแตกต่างของสีระหว่างตัวอย่างและมาตรฐาน คำนวณได้จากค่า L^* a^* b^* color differences (หรือ ΔL^* , Δa^* , Δb^*) โดยค่า ΔE^* บอกได้แต่ขนาดของความแตกต่างแต่ไม่บอกทิศทาง คือไม่สามารถบอกได้ว่าสว่างกว่า มีดกว่า แดงกว่า หรือเขียวกว่า เป็นต้น ซึ่งค่า ΔE^* คำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\Delta E^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$$

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาสารออกฤทธิ์ชีวภาพและการออกฤทธิ์ต่อสุขภาพ

Lapidot และคณะ (1999 : 67-70) ได้ศึกษาคูณสมบัติในการเป็นสารต้านออกซิเดชันของแอนโทไซยานินในรูปแบบต่าง ๆ เมื่อพีเอชเปลี่ยนไป พบว่าแอนโทไซยานินในรูปแบบ quinodal-base ของมอลวิดิน-3-กลูโคไซด์ (malvidin-3-glucoside) มีผลในการยับยั้งการเกิดเปอร์ออกซิเดชันของลิโนเลอเทอ (linoleate) ในไมโอโกลบิน และให้ผลในการยับยั้งได้ดีกว่าคาเทชิน (catechin) ซึ่งเป็นสารต้านออกซิเดชันที่ใช้กันจำนวนมาก ในส่วนของการเกิดเปอร์ออกซิเดชันของไขมันในเยื่อหุ้มเซลล์นั้นพบว่าประสิทธิภาพการเป็นสารต้านออกซิเดชันขึ้นอยู่กับตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น เมื่อระบบมี H_2O_2 -activated myoglobin เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่ามอลวิดิน-3-กลูโคไซด์มีประสิทธิภาพในการเป็นสารต้านออกซิเดชันดีกว่าคาเทชิน มอลวิดิน และเรสเวอราทรอล ตามลำดับ

Ling และคณะ (2001 : 1421-1426) ได้ศึกษาผลของข้าวสีแดงและข้าวสีดำต่อการลดการสะสมของพลา๊ก (plaque) ในหลอดเลือดและเพิ่มภาวะการต้านอนุมูลอิสระในกระต่าย โดยทดลองให้อาหารธรรมชาติ ให้อาหารที่มีคอเลสเตอรอลสูง ให้อาหารที่มีคอเลสเตอรอลสูงพร้อมเสริมข้าวขาวในอาหาร ให้อาหารคอเลสเตอรอลสูงพร้อมเสริมข้าวสีแดง และ ให้อาหารที่มี

คอเลสเตอรอลสูงพร้อมเสริมข้าวสีดำ พบว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับการเสริมข้าวมีสีเกิดผลมากกว่ากลุ่มที่ได้รับการเสริมข้าวมีสีในอาหาร ($P < 0.05$) ถึง 50% นอกจากนี้อาหารที่เสริมด้วยข้าวมีสียังช่วยเพิ่มระดับเอชดีแอล คอเลสเตอรอล (HDL cholesterol) และ apolipoprotein A-I ให้สูงขึ้น ช่วยลดระดับของ Reactive Oxygen Species (ROS) และ MDA ในตับ และมีระดับความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระกับระดับของเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเตส (superoxide dismutase, SOD) สูงกว่าเมื่อเทียบกับกระต่ายกลุ่มที่ไม่ได้ทำการเสริมข้าวมีสี ($p < 0.05$) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการบริโภคข้าวสีแดงและข้าวสีดำสามารถช่วยป้องกันการเกิดการอุดตันในหลอดเลือด และยังเพิ่มระดับเอชดีแอล คอเลสเตอรอล (HDL cholesterol) ซึ่งเป็นคอเลสเตอรอลชนิดดี รวมทั้งทำให้ apo A-I สูงขึ้น ช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระและลดสารอนุมูลอิสระในหลอดเลือดได้

Kanaya และคณะ (2004 : 157-160) ได้ศึกษาสารสกัดจากรำข้าวในการป้องกันการเพิ่มเปอร์ออกซิเดชันของไขมันในพลาสมาในหนูที่เป็นโรคเบาหวาน โดยมีการศึกษาประสิทธิภาพของการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากรำข้าวที่มีชื่อทางการค้าว่า Ricetrienol[®] ซึ่งประกอบไปด้วยสารออกฤทธิ์ที่สำคัญ 3 ชนิดคือ แอลฟาโทโคเฟอรอล (α -tocopherol), โทโคไตรเอนอล (tocotrienol) และกลุ่มของไฟโตสเตอรอล (phytosterols) ทำการทดลองในหนูที่เป็นโรคเบาหวาน (diabetic KKAY mice) และหนูที่ไม่เป็นโรค ซึ่งผลจากการทดลองพบว่าภาวะเครียดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันจะแสดงออกโดยมีการเพิ่มขึ้นของ Urine 8-isoprostane และ 8-OHdG ซึ่งเป็นภาวะที่ทำให้โรคเบาหวานมีความรุนแรงขึ้น การให้สารสกัดจากรำข้าวสามารถยับยั้งการเพิ่มขึ้นของเปอร์ออกซิไลปิด (peroxy lipid; MDA) ได้ และมีแนวโน้มในการลดระดับของ Urine 8-isoprostane และ 8-OHdG นอกจากนี้ยังเพิ่มระดับการแสดงออกของ GPx mRNA ในไตและระดับของแอลฟาโทโคเฟอรอลในเลือด ซึ่งมีผลดีต่อการกำจัดอนุมูลอิสระและป้องกันการเกิดโรคแทรกซ้อนอื่น ๆ ดังนั้นสารสกัดรำข้าวจึงมีผลต่อการป้องกันและต้านทานความเสียหายอันเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่สัมพันธ์กับโรคเบาหวานได้

Nam และคณะ (2005 : 741-745) ได้ศึกษาผลของรงควัตถุมีสีจากรำข้าวมีสีในการยับยั้งการเจริญของเนื้องอกและเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวที่ไม่มีสีพบว่าสารสกัดจากรำข้าวมีสีมีความสามารถในการยับยั้งการเจริญของเนื้องอกได้มากกว่า

Boonsit และคณะ (2006 : 191-194) ได้ศึกษาปริมาณแกมมาออริซานอล (γ -oryzanol) ในข้าวเหนียวดำพื้นเมืองของไทย โดยทำการทดลองเกี่ยวกับปริมาณแกมมาออริซานอลในเมล็ดข้าวกล้องที่ได้จากข้าวเหนียวดำ 10 สายพันธุ์ และข้าวขาว 2 สายพันธุ์ โดยทำการวิเคราะห์ปริมาณไขมันโดยรวม แกมมาออริซานอลกิ่งบริสุทธ์ และแกมมาออริซานอลบริสุทธ์ แม้จะพบว่าปริมาณไขมันของข้าวเหนียวดำและข้าวขาวไม่แตกต่างกัน แต่ก็พบว่าในกลุ่มของข้าวเหนียวดำทุกพันธุ์มีปริมาณแกมมาออริซานอลที่สูงกว่าในกลุ่มของข้าวขาว

Chen และคณะ (2006 : 218-229) ทำการศึกษาผลของแอนโทไซยานินในข้าวเหนียวดำต่อการยับยั้งเซลล์มะเร็ง โดยทำการศึกษาในเซลล์ของมนุษย์ พบว่าแอนโทไซยานินในข้าวเหนียวดำมีผลต่อการยับยั้งการเจริญของเซลล์มะเร็งได้หลายชนิด

Nam และคณะ (2006 : 613-620) ได้ศึกษากิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระจากรำข้าวมีสีสายพันธุ์ต่าง ๆ โดยทำการทดลองเปรียบเทียบกับรำข้าวไม่มีสี พบว่าในกลุ่มของข้าวมีสีมีกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าข้าวที่ไม่มีสี โดยผลที่ได้จากการวิจัยนี้ทำให้ทราบถึงศักยภาพในการใช้ข้าวมีสีจากหลากหลายสายพันธุ์ทำเป็นผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติสามารถพัฒนาเป็นอาหารเสริมสุขภาพได้

Xia และคณะ (2006 : 220-225) ได้ศึกษาสารสกัดแอนโทไซยานินจากข้าวเหนียวดำ (black rice) ในการเสริมความคงตัวของพลาต (plaque) ในหลอดเลือดของหนูที่ขาด apolipoprotein-E โดยการศึกษาผลของสารสกัดแอนโทไซยานินจากข้าวเหนียวดำต่อพลาต (plaque) ที่มีความอ่อนแอในหนู โดยแบ่งหนูที่เป็นโรคขาด apolipoprotein-E ออกเป็น 3 กลุ่มคือ กลุ่มควบคุม (control group) ให้อาหาร AIN-93G diet, Simvastatin group ให้อาหาร AIN-93G diet + simvastatin 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของอาหาร และ anthocyanin rich extract group ให้อาหาร AIN-93G diet เสริมด้วยสารสกัดที่อุดมด้วยแอนโทไซยานิน (anthocyanin rich extract) 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของอาหาร การทดลองพบว่าการเสริมสารสกัดที่อุดมด้วยแอนโทไซยานินในอาหารจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของไขมัน และช่วยลดไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) คอเลสเตอรอลรวม (total cholesterol) และคอเลสเตอรอลที่ไม่ใช่เอชดีแอล คอเลสเตอรอล (HDL cholesterol) ให้ต่ำลง และยังสามารถเสริมให้เกิดความคงตัวของพลาตในหนูขาด apolipoprotein-E ได้ ดังนั้นจึงช่วยป้องกันการอุดตันและการบาดเจ็บของหลอดเลือดได้

Guo และคณะ (2007 : 1-6) ได้ศึกษาผลของสารสกัดที่อุดมด้วยแอนโทไซยานิน (anthocyanin rich extract; AREBR) จากข้าวเหนียวดำ ต่อภาวะไขมันในเลือดสูงและภาวะการต้านทานอินซูลินในหนูที่ให้ฟรุคโตส ซึ่งการทดลองได้แบ่งหนูออกเป็น 5 กลุ่ม กลุ่มแรกเป็น control ได้รับอาหารธรรมดา, High-fructose ให้อาหารที่มีฟรุคโตสสูงเป็นเวลา 8 สัปดาห์, AREBR ได้รับอาหารที่มี High-fructose เสริมด้วย AREBR เป็นเวลา 8 สัปดาห์, AREBR-treated เป็นกลุ่มที่ให้การรักษาโดยใช้ AREBR คือให้อาหารที่มี fructose สูงเป็นเวลา 8 สัปดาห์แล้วให้อาหารที่เสริม AREBR ในสัปดาห์ที่ 5-8 และกลุ่ม Pio-treated เป็นกลุ่มที่ให้การรักษาโดยยารักษาโรคเบาหวานในสัปดาห์ที่ 5-8 ของการให้อาหาร High-fructose โดยจากการทดลองพบว่าในหนูที่ให้ High-fructose เป็นเวลา 4 สัปดาห์จะมีระดับของฮอร์โมนอินซูลินในพลาสมาสูงและมีความไวต่ออินซูลินต่ำ ซึ่งการเสริมอาหารด้วย AREBR จะช่วยป้องกันการคือต่ออินซูลินได้ใกล้เคียงกับยาไพโอกลิตาโซน (pioglitazone) ซึ่งช่วยลดความบกพร่องในการทนต่อน้ำตาลและภาวะการมีไขมัน

ในเลือดสูง นอกจากนั้นการเสริมสารสกัดจากข้าวเหนียวดำยังช่วยลดภาวะเครียดออกซิเดชัน (oxidative stress) ให้ต่ำลง ดังนั้นจะเห็นว่าสารสกัดแอนโทไซยานินจากข้าวเหนียวดำ ช่วยรักษาความผิดปกติที่เกิดจากเมตาบอลิซึมในร่างกายได้

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาศักยภาพในการเป็นสีผสมอาหาร

Pazmino-Doran และคณะ (2001 : 211-216) ได้ศึกษาศักยภาพในการเป็นสีผสมอาหารของแอนโทไซยานินในออกซาลิส (oxalis) ซึ่งเป็นพืชที่มีลักษณะเป็นสีม่วง พบว่าโดยส่วนใหญ่แล้วแอนโทไซยานินในใบออกซาลิสจะเป็น malvidin-3,5-diglucoside มีประมาณ 195 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมของใบ และมีความเข้มข้นของสารแอนโทไซยานินสูง มีศักยภาพและลักษณะที่ต้องการสำหรับใช้เป็นสีผสมอาหารจากธรรมชาติได้

Coisson และคณะ (2005 : 893-897) ได้ศึกษาการใช้ *Euterpe oleracea* ซึ่งเป็นผลไม้ที่อุดมไปด้วยสารแอนโทไซยานินและสารประกอบฟีนอล (phenolic compounds) ในการเป็นสารให้สีในโยเกิร์ตเพื่อสุขภาพ โดยใช้น้ำเอไค (*Euterpe juice*) ที่พีเอช 4.9 ความเข้มข้น 10% w/w (เป็นปริมาณที่ใช้ในอุตสาหกรรม พิจารณาจากความข้นหนืดของน้ำเอไค) ผสมลงในโยเกิร์ตธรรมชาติพีเอช 3.66 หลังการเติม *Euterpe juice* ในโยเกิร์ตพบว่าไม่ทำให้พีเอชของโยเกิร์ตเปลี่ยนแปลง ส่วนการวิเคราะห์ commercial bilberry-enriched yogurt (ปริมาณ juice 8.6%) ซึ่งเป็นโยเกิร์ตทางการค้าที่เติมบิลเบอร์รี่ (bilberry) มีพีเอชเป็น 3.70 และสีของโยเกิร์ตที่เติมน้ำเอไคก็มีลักษณะคล้ายกับโยเกิร์ตทางการค้าที่เติมบิลเบอร์รี่ (bilberry) และยังพบว่าปริมาณแอนโทไซยานินในโยเกิร์ตระดับหนึ่งองค์ประกอบของโปรตีนในโยเกิร์ตก่อนและหลังเติมน้ำเอไคไม่มีความแตกต่างกัน ($p > 0.05$) และยังไม่แตกต่างจากโยเกิร์ตทางการค้าที่เติมบิลเบอร์รี่ (bilberry) จากการศึกษาสรุปได้ว่าการเติมน้ำเอไคเพื่อเพิ่มคุณค่าต่อสุขภาพแก่โยเกิร์ต ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์โยเกิร์ตที่มีกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระดีขึ้น และไม่มีผลทำให้เกิดการจับตัวกันของโปรตีนตกตะกอนซึ่งเป็นลักษณะที่ไม่ดีในโยเกิร์ต โดยคุณสมบัติของโปรตีนในโยเกิร์ตชนิดใหม่จะเหมือนกับโยเกิร์ตเริ่มต้นที่ยังไม่เติมน้ำเอไค นอกจากนั้นยังช่วยเพิ่มสีกลิ่น และรสจากธรรมชาติ ได้เป็นผลิตภัณฑ์โยเกิร์ตเพื่อสุขภาพที่มีความแปลกใหม่และเพิ่มคุณค่าให้แก่ผลิตภัณฑ์ได้มากขึ้น ดังนั้นเอไคจึงมีศักยภาพในการใช้เป็นสีผสมอาหารจากธรรมชาติเพื่อสุขภาพได้

Wang และคณะ (2007 : 271-275) ได้ศึกษาเกี่ยวกับความคงตัวของแอนโทไซยานินจากน้ำแบลคเบอร์รี่ (blackberry) และน้ำแบลคเบอร์รี่เข้มข้น โดยศึกษาความคงตัวต่อความร้อนและการเก็บรักษา ใช้อุณหภูมิในช่วง 60-90 องศาเซลเซียส และช่วง 5-37 องศาเซลเซียส พบว่าการสลายตัวของแอนโทไซยานินเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง การสลายตัวขึ้นกับอุณหภูมิเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะเกิดการสลายตัวได้มากขึ้น และน้ำแบลคเบอร์รี่ที่เข้มข้นสูงจะทำให้เกิดการสลายตัวของ

แอนโทไซยานินได้มากกว่าที่ความเข้มข้นต่ำ ดังนั้นการแปรรูปน้ำเบลคเบอร์รี่จึงควรใช้ที่อุณหภูมิต่ำ และให้ความร้อนในช่วงสั้น ๆ และทำที่ความเข้มข้นต่ำ

Duangmal และคณะ (2008 : 1437-1445) ได้ศึกษาการทำแห้งสารละลายสกัดแบบเยือกแข็ง รวมทั้งศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสีแอนโทไซยานินที่ได้จากทำแห้งแบบเยือกแข็ง และนำไปประยุกต์ใช้ในน้ำหวาน โดยทำการสกัดกระเจี๊ยบแดงด้วยน้ำและเอทานอล (1:1) ปรับพีเอช เป็น 2.5 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก อัตราส่วนระหว่างปริมาณกลีบกระเจี๊ยบแดงต่อตัวทำละลายเป็น 1:5 แล้วศึกษาการทำแห้งแบบเยือกแข็งของสารสกัดแอนโทไซยานินโดยใช้ทริฮาโลส และมอลโตเด็คซ์ทรินเป็นสารให้ความคงตัวที่ระดับความเข้มข้น 2 และ 3% (w/v) พบว่าหลังการทำแห้งมีค่าร้อยละปริมาณแอนโทไซยานินคงเหลือและค่า degradation index (DI) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม และเมื่อเก็บรักษาแอนโทไซยานินทำแห้งแบบเยือกแข็งที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 สัปดาห์ พบว่าในทุกตัวอย่างมีค่าร้อยละปริมาณแอนโทไซยานินคงเหลือและค่าความเข้มสี (chroma) ของสีลดลง เมื่อพิจารณาค่าครึ่งชีวิตของแอนโทไซยานิน พบว่าสีแอนโทไซยานินทำแห้งแบบเยือกแข็งที่ใส่มอลโตเด็คซ์ทรินความเข้มข้น 3% (w/v) มีค่าครึ่งชีวิตมากที่สุดคือ 247 วันและค่าความเข้มสีลดลงน้อยกว่าตัวอย่างอื่น เมื่อศึกษานำไปใช้โดยทำระบบจำลองในน้ำหวาน โดยผสมสี 3 ชนิดคือ สีแอนโทไซยานินที่สกัดจากกระเจี๊ยบแดง สี SAN RED RC(R) และสีสังเคราะห์คือสีคาร์โมอิซิน เมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 84 วันพบว่าค่า L^* ค่า ΔE^*_{ab} และค่ามุมของสี (hue angle) ในน้ำหวานใส่สีแอนโทไซยานินทั้งสองชนิดมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่า a^* และค่าความเข้มสีมีค่าลดลงนั่นคือมีสีซีดลง ในขณะที่น้ำหวานที่ใส่สีคาร์โมอิซินไม่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าดังกล่าวข้างต้น ผลการทดสอบด้านประสาทสัมผัสด้านความชอบโดยรวมพบว่า น้ำหวานที่ใส่สีแอนโทไซยานินจากกลีบดอกกระเจี๊ยบแดง ผู้ทดสอบไม่ยอมรับหลังจากผ่านไป 56 วัน ในขณะที่น้ำหวานที่ใส่สี SAN RED RC(R) และสีคาร์โมอิซิน ได้รับการยอมรับตลอดระยะเวลา 84 วัน